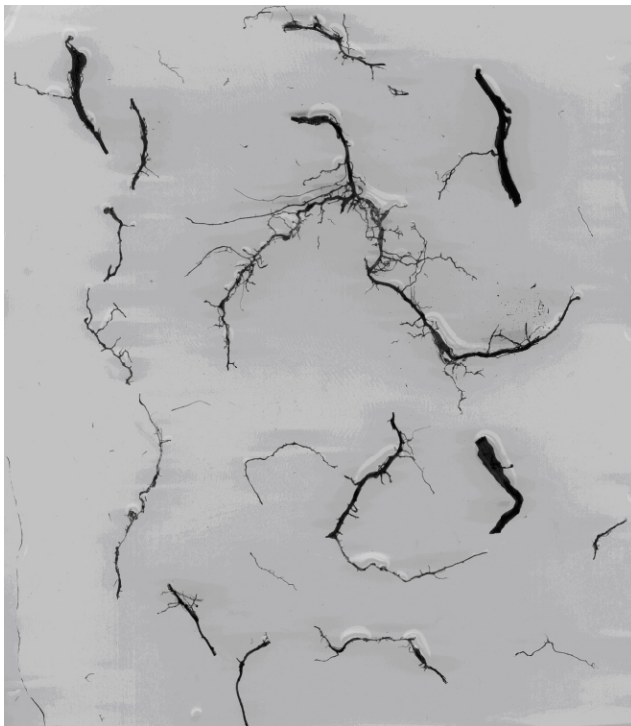


Safira: Sistema de Análise de Fibras e Raízes



ISSN 1678-0434

Novembro, 2008

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 24

Safira: Sistema de Análise de Fibras e Raízes

Lúcio André de Castro Jorge
Alex Fernando de Oliveira Rodrigues

Embrapa Instrumentação Agropecuária
São Carlos, SP
2008

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rua XV de Novembro, 1452

Caixa Postal 741

CEP 13560-970 - São Carlos-SP

Fone: (16) 2107 2800

Fax: (16) 2107 2902

<http://www.cnpdia.embrapa.br>

E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso

Membros: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori,

Dr. João de Mendonça Naime,

Dr. Washington Luiz de Barros Melo

Valéria de Fátima Cardoso

Membro Suplente: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto

Normalização bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso

Tratamento de ilustrações: Valentim Monzane

Foto da capa: Arquivo Embrapa Instrumentação

Editoração eletrônica: Manoela Campos

1ª edição

1ª impressão (2008): tiragem 300

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.
Embrapa Instrumentação Agropecuária**

J82s Jorge, Lúcio André de Castro

Safira: sistema de análise de fibras e raízes. / Lúcio

André de Castro Jorge, Alex Fernando de Oliveira Rodrigues. São Carlos:
Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008.

20 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa e
Desenvolvimento, ISSN 1678-0434; 24)

1. Imagens - Processamento. 2. Redes neurais. 3. Fibras - Análise.
4. Raízes - Análise. 5. Solo - Manejo. I. Rodrigues, Alex Fernando de Oliveira.
II. Título. III. Série.

CDD 21 ED 006.42
006.3

© Embrapa 2008

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
1. Introdução	7
2. Revisão	7
3. Materiais e métodos	9
4. Resultados	11
Conclusões	18
Referências	18

Safira: Sistema de Análise de Fibras e Raízes

Lúcio André de Castro Jorge¹

Alex Fernando de Oliveira Rodrigues²

Resumo

As técnicas de processamento e análise de imagens digitais têm proporcionado avanços significativos em diferentes áreas e, em especial, no estudo do sistema radicular de plantas e de fibras.

Em 1996 foi lançado o SIARCS® (Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo), ferramenta precisa, rápida e de custo reduzido, que tinha como objetivo apresentar uma nova proposta metodológica de avaliação da distribuição do sistema radicular em campo por meio do processamento de imagens, substituindo a quantificação visual feita através de quadros reticulados. O emprego do SIARCS®, desde então, tem permitido a quantificação de raízes lavadas e em perfis de solos, de forma muito menos trabalhosa, mais rápida e detalhada, viabilizando mais repetições experimentais. Vários trabalhos têm sido publicados ao longo destes anos mostrando que esta ferramenta tem se destacado na análise de raízes e fibras no Brasil.

Apesar de ferramenta bastante utilizada, o SIARCS apresenta algumas limitações de análise, tais como ferramentas morfológicas. Desta forma, está sendo desenvolvido o Sistema de Análise de Fibras e Raízes - SAFIRA, com o objetivo de possibilitar medidas de área superficial, volume e comprimento das fibras e raízes, por classes de diâmetros.

Termos para indexação: raízes, fibras, imagens, análise morfológica.

¹Eng. Eletrônico, MSc., Pesquisador, Embrapa Instrumentação Agropecuária, C.P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, lucio@cnpdia.embrapa.br

²Eng. Computação, Graduando, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, alferodrigues@gmail.com

SAFIRA: Root and Fibers Analysis System

Lúcio André de Castro Jorge¹

Alex Fernando de Oliveira Rodrigues²

Abstract

Image processing techniques have been providing significant improvements in different areas, especially to the root system and the fibers studies. In 1996 it was launched SIARCS® (Integrated System for Root and Soil Cover Analysis), a new methodology to study the distribution of root system in the field that works fast and at a low cost, instead of visual quantification. The use of the SIARCS®, ever since, has been allowing the quantification of roots on soil profiles and is a good deal to improve the studies.

A lot of works had been published last years showing that SIARCS is the most used system on root and fibers analysis into the Brazil. In spite of quite used, the SIARCS presents some limitations of analysis, such as morphological tools. From this it is being developed a new System to Root and Fibers Analysis SAFIRA that allows the measurement of superficial area, volume and length of fibers and roots by diameters classes.

Index terms: root analysis, fibers analysis, image processing, morphological analysis.

1. Introdução

Vários trabalhos têm demonstrado a importância do estudo do sistema radicular de diferentes plantas cultivadas, apresentando também várias metodologias para caracterização de raízes, levando em conta custo, precisão e tempo de análise.

Dentre os métodos mais utilizados no Brasil, destacam-se os métodos para análise de raízes lavadas (blocos ou monólito e trado) e outros para raízes em perfil de solo (trincheira ou parede do perfil e rhizotron) (BÖHM, 1979). O SIARCS, através da análise de imagens digitais, pode ser considerado um avanço nas técnicas de estudo do sistema radicular, pois permitiu a realização destas duas formas de avaliação de modo mais rápido e preciso.

A primeira geração do SIARCS foi apresentada por Crestana et al. (1994), já permitindo avaliar qualitativa e quantitativamente a distribuição de raízes, eliminando-se grande parte da subjetividade encontrada nos métodos de perfil e melhorando a precisão na análise. Na segunda geração do SIARCS (JORGE e CRESTANA, 1996) foi possível determinar o comprimento, a distribuição e a área ocupada pelas raízes. Para amostras de raízes lavadas, este também foi utilizado na determinação do comprimento total das raízes, porém com algumas limitações.

Devido a necessidade de novas ferramentas voltadas para análise de raízes lavadas, bem como análise de fibras vegetais, a Embrapa Instrumentação está trabalhando na ferramenta SAFIRA. Através desta nova proposta, pretende-se disponibilizar a análise de raízes lavadas bem como incluir a análise de fibras, pelo fato das análises serem parecidas e demandarem as mesmas soluções. As novas ferramentas estão sendo disponibilizadas na página da Embrapa Instrumentação (<http://www.cnpdia.embrapa.br/labimagem>). Todas as versões serão disponibilizadas gratuitamente.

2. Revisão

Vários trabalhos, que utilizam os diferentes métodos de amostragem descritos por Bohm (1979), têm procurado apresentar uma metodologia para a caracterização de raízes levando em conta o custo, precisão e tempo de análise. Destaca-se dentre os parâmetros avaliados, o comprimento que é um dos parâmetros mais representativos do desenvolvimento do sistema radicular. Porém, muitas vezes, não é levado em conta devido ao tempo e às dificuldades metodológicas de sua avaliação. Nesse sentido, vários trabalhos, desde procedimentos manuais até sistemas automáticos, têm sido apresentados. Alguns têm proposto diferentes soluções metodológicas, principalmente, através de detectores fotoelétricos e através de imagens digitalizadas.

Muitos procedimentos para estimar o comprimento de raízes e fibras são na realidade modificações do princípio de intersecção de uma linha apresentado por Newman (1966). O procedimento original é baseado na relação matemática entre o comprimento de segmentos de raízes e o número de intersecções entre raízes e linhas retas orientadas randomicamente. Essa relação foi adaptada por Marsh (1971), para quantificação visual de amostras de raízes usando-se uma grade, e por Tennant (1975). Posteriormente, sistemas automatizados para contagem da intersecção de raízes e uma grade uniformemente espaçada foram apresentados (ROWSE e PHILLIPS, 1974; GOURBRAN e RICHARDS, 1979; RICHARDS et al., 1979; WILHELM et al., 1983; OTTMAN e TIMM, 1984; COLLINS et al., 1987). Com a utilização de câmeras de vídeo e sistemas de análise de imagens foram obtidas imagens de raízes e essas analisadas de forma semi-automática (VOORHEES et al., 1980; COSTIGAN et al., 1982; BARNETT et al., 1987; BURKE e LEBLANC, 1988; CUNNINGHAM et al., 1989; HARRIS e CAMPBELL, 1989).

Sistemas detectores fotoelétricos demonstraram ser precisos e de alta resolução ótica para detecção de raízes ou fibras finas (RICHARDS et al., 1979; WILHELM et al., 1983; COLLINS et al., 1987). Contudo, outros parâmetros, tais como, o diâmetro e área foram avaliados por análise de imagens em restritos trabalhos, e o alto custo e complexidade desses sistemas de análise limitaram, no início, seu uso e difusão. No entanto, maior flexibilidade foi encontrada no cálculo da área e diâmetro de raízes através de sistemas baseados em câmeras de vídeo (Harris e Campbell, 1989). O tempo de análise foi reduzido sensivelmente com esse sistema. Posteriormente, resoluções de 0,3 a 0,7 mm foram encontradas com a utilização de modelos de câmeras mais recentes (VOORHEES et al., 1980; CUNNINGHAM et al., 1989; HARRIS e CAMPBELL, 1989). E assim, sucessivamente, áreas cada vez menores foram avaliadas através de sistemas de maior resolução. O uso do princípio de intersecção de linhas para calcular o comprimento de raízes em sistemas com câmeras apresentou erros devido à sobreposição de raízes (BARNETT et al., 1987) e foram corrigidos através de compensação e mudança de resolução por Harris e Campbell (1989). Lebowitz (1988) sugeriu que algoritmo de afinamento fosse utilizado para obter imagens de raízes com largura de um pixel para análise posterior da imagem. Nesse caso, foi comparado o método de intersecção com o método de contagem de pixels, sendo o último o mais preciso.

Os scanners de mesa, desenhados originalmente para editoração, possuem características óticas superiores, possibilitando a obtenção de imagens de raízes com alta resolução. Krstansky e Henderson (1989) usaram esse equipamento para estimar o comprimento de raízes pelo método de intersecção. Pan e Bolton (1991) expandiram o uso desses para análise de imagens de sistemas radiculares incluindo o diâmetro e área estimada tanto quanto o comprimento de raízes usando detecção de bordas. Jorge et al. (1995), demonstraram uma comparação com a técnica de intersecção manual apresentada por Tennant (1975), com a intersecção automática utilizando um algoritmo para cálculo da dimensão fractal apresentado por Jorge et al. (1993) e com a contagem de pixels de raízes após o afinamento, conforme sugerido por Lebowitz (1988) e utilizada por Zoon e Van Tienderen (1990).

Com o objetivo de implementar uma ferramenta para auxílio nos estudos de raízes, em condições de campo, proporcionando maior rapidez e precisão, foi desenvolvido, na EMBRAPA Instrumentação, um pacote baseado em processamento e análise de imagens digitais denominado Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo - SIARCS (CRESTANA et al., 1994; JORGE e CRESTANA, 1996).

De maneira geral, os parâmetros mais utilizados na avaliação da eficiência na absorção de nutrientes das plantas são a massa fresca ou seca, a área superficial, o comprimento e o raio médio do sistema radicular. Embora cada parâmetro citado apresente limitações e vantagens quanto ao seu uso, a área superficial e o comprimento de raízes são preferidos e mais utilizados para a expressão das taxas de absorção de água e de nutrientes, além de refletir os efeitos bióticos e abióticos do meio.

A não determinação direta da área superficial e do diâmetro radicular, que determinam em parte o potencial de uma planta para absorção de água e nutrientes, tem sido uma grande dificuldade nos métodos utilizados, inclusive o SIARCS.

3. Materiais e Métodos

A nova forma de análise baseada na transformada de distância e outros métodos apresentados nos diversos trabalhos presentes na literatura foram utilizados no SAFIRA para determinar os parâmetros de análise morfológica das raízes e fibras. São eles:

Método do Perímetro: primeiro se deve identificar a raiz ou fibra e armazenar o valor referente a sua área. Em seguida, seleciona-se somente a borda e obtêm-se o perímetro, medindo as distâncias entre os pontos centrais de cada pixel pertencente à borda. Com os dados referentes ao perímetro e à área se determina o comprimento e a largura das raízes analisadas.

O comprimento (C) das raízes ou fibras é determinado por:

$$C = A / L \quad (1)$$

sendo, A a área e L a largura.

A largura L é calculada por:

$$L = \frac{P \sqrt{P^2 - 16A}}{4} \quad (2)$$

sendo, P o perímetro.

Na Figura 1 é apresentado um esquema ilustrativo do cálculo das distâncias entre os pontos centrais de cada pixel da borda. A soma de todas as distâncias dos pixels de borda resulta no perímetro.

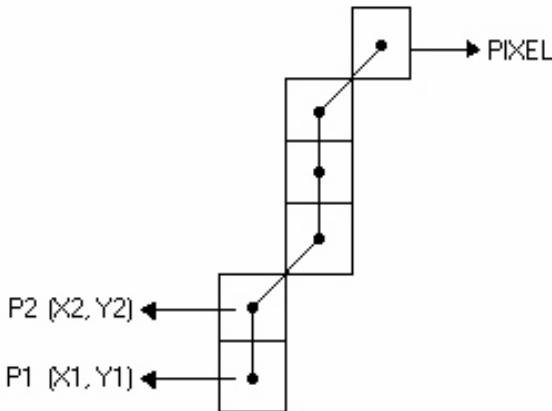


Fig. 1. Representação as distâncias entre os pixels na borda de uma raiz ou fibra

A distância entre os pontos P1 e P2 é dada por:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3)$$

Método do Retângulo: através deste método, identificam-se as raízes ou fibras e encontra-se o melhor retângulo que as circunscreve. Na sequência, as dimensões comprimento e largura da raiz são, respectivamente, o comprimento e a largura do retângulo utilizado. Na Figura 2, é apresentada uma representação do método de análise. Os resultados para raízes muito curvas ou de forma não linear estarão muito distantes dos valores reais esperados. Já para a análise de raízes retilíneas o método se apresenta como uma ferramenta de grande precisão e utilidade.

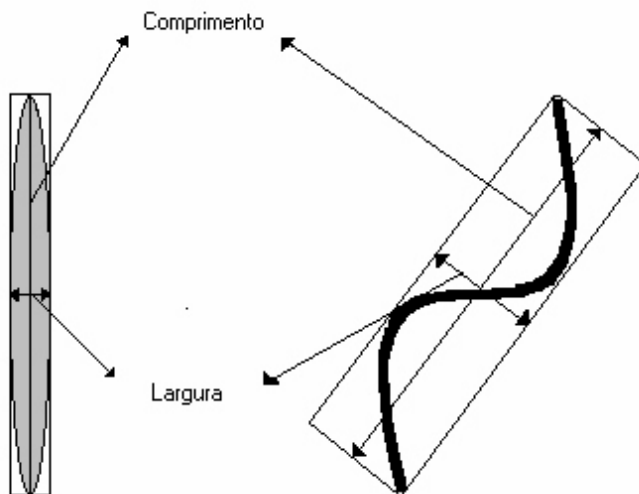


Fig. 2. Representação do retângulo que circunscreve o objeto em análise

Método do Esqueleto (SIARCS versão 3.0): o método do esqueleto se subdivide em outros dois métodos de análise; o primeiro tem como fundamento o cálculo das distâncias entre cada pixel pertencente ao esqueleto do objeto (Fig. 3); o segundo obtém os parâmetros desejados utilizando os resultados do cálculo do tamanho de cada pixel deste esqueleto, sendo que o somatório de unidades de comprimento encontradas resulta no comprimento da raiz.

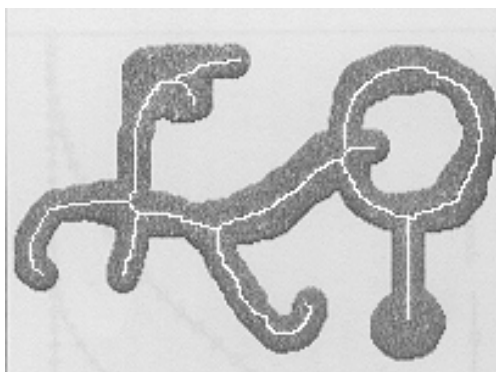


Fig. 3. Ilustração do esqueleto utilizado na análise

Método da Distância - Abordagem Geodesiana: o primeiro passo realizado por este método é a erosão da imagem original em tons de cinza através de uma máscara adequada. Esta operação de erosão é uma das ferramentas da Morfologia Matemática (JAIN, 1989). Na sequência, obtém-se uma imagem do esqueleto do objeto. Em seguida, percorre-se toda a imagem e, na posição onde se encontra um pixel pertencente ao esqueleto, recorre-se à imagem erodida anteriormente verificando qual a distância do pixel à extremidade. Os resultados obtidos são apresentados em gráficos de frequência de distâncias, ou histogramas de distâncias.

4. Resultados

O software para análise de fibras e raízes - SAFIRA, permite obter uma boa estimativa dos diâmetros dos objetos na imagem através da transformada de distância. O processo de obtenção do esqueleto também é eficaz para obter a parte central do objeto. Um problema surge quando a imagem for muito grande: o desempenho diminui e a etapa de rotulação e aplicação do filtro de objetos torna-se um tanto quanto lenta.

Uma imagem típica do esqueleto já rotulado por diferentes cores, representando as diferentes faixas de diâmetros está demonstrada na Figura 4. Na Figura 5 são apresentados os histogramas referentes às fibras da Figura 4 e, na Figura 6, os resultados, calculados para cada uma das fibras: volume, área superficial e diâmetros médios ponderados.

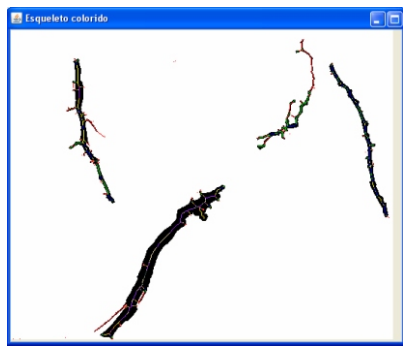


Fig. 4. Esqueleto mostrando regiões das fibras com diferentes diâmetros

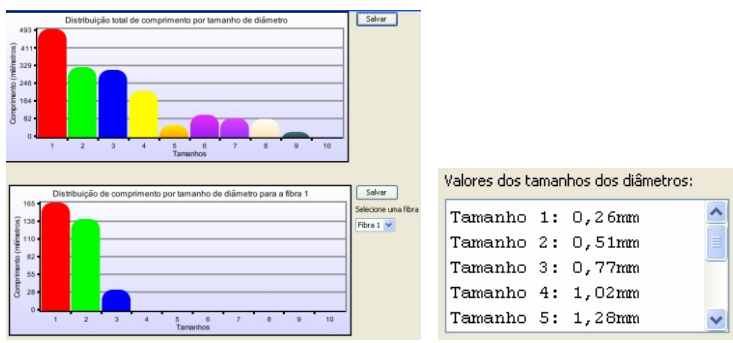


Fig. 5. Histogramas de comprimentos das segundo as classes de diâmetros

Fibra #	Volume (mm³)	Área superficial (mm²)	Diâmetro médio ponderado (mm)
1	6.7184486	56.020397	0.41109923
2	26.003925	121.16563	0.65244496
3	17.289082	87.884995	0.7341892
4	115.91644	287.75125	1.1925004

Exportar para o Excel

Fig. 6. Resultados dos cálculos através do SAFIRA para as fibras da imagem da Figura 4

Quando o software SAFIRA for executado, a interface apresentada na Figura 7 será exibida para o usuário.

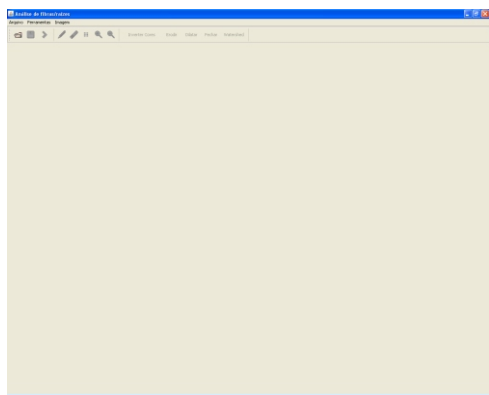


Fig. 7. Interface principal do software SAFIRA

Grande parte das funcionalidades podem ser acessadas através de botões na barra de ferramentas, conforme apresenta a Figura 8.

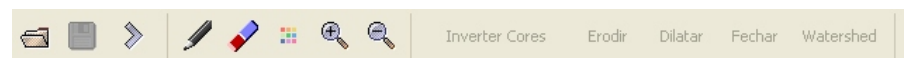


Fig. 8. Barra de ferramentas do SAFIRA

O software SAFIRA trabalha com formato padrão de imagem JPEG ou BMP. Estas imagens são adquiridas de acordo com a metodologia de análise de raízes ou fibra adotada. Em geral um padrão típico de imagem de raízes lavadas pode ser observado na Figura 9.



Fig. 9. Imagem típica de raízes lavadas

Existem funcionalidades utilizadas para retocar a imagem, permitindo assim pequenas correções nas mesmas. Este tipo de funcionalidade pode ser utilizada através das opções disponíveis no menu ferramentas, conforme apresentado na Figura 10.



Fig. 10. Acessando opções para retocar a imagem via menu

Também através do menu pode-se selecionar o zoom na imagem ou utilizar as teclas + e - para mudar o modo de visualização da imagem, conforme apresenta a Figura 11.



Fig. 11. Acessando as opções de zoom via menu

Depois de qualquer retoque feito na imagem original, deve-se seguir para a próxima etapa do processamento através do botão avançar, o terceiro da esquerda para a direita. A próxima etapa é a segmentação da imagem, que consiste na binarização e rotulação dos objetos da mesma. Na binarização a ideia é identificar os objetos de interesse de análise, deixando em preto e branco a imagem final, sendo que os objetos em preto e o fundo da imagem. Isto é feito por meio da técnica de segmentação por limiarização, onde um valor é escolhido para ser o valor limiar e os valores dos pixels da imagem são ajustados comparando-os com este limiar. Uma nova janela será aberta na tela nessa etapa, conforme se apresenta na Figura 12.

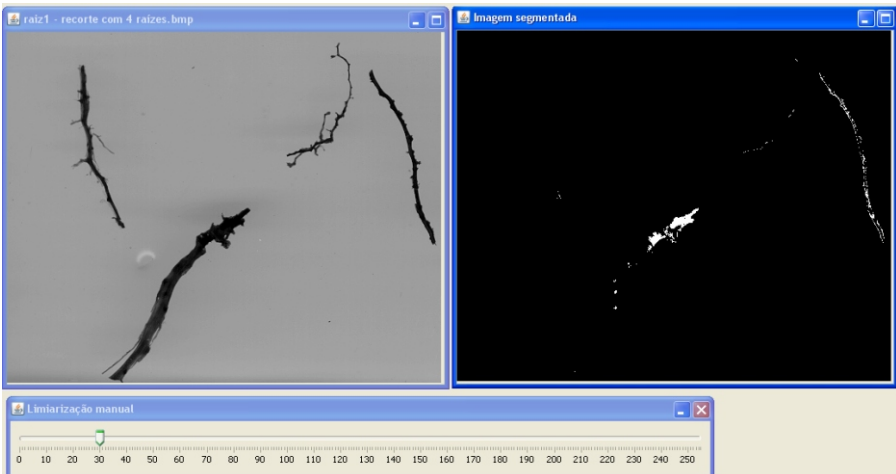


Fig. 12. Etapa de binarização da imagem

Através da barra deslizante, presente na Figura 12, é possível estabelecer um valor para o limiar. Se este for alterado, o processo de binarização é refeito. Existem dois tipos de binarização: global e local. Pode-se escolher um deles através do menu Imagens.

Na binarização global, a imagem toda é afetada por uma alteração no valor do limiar. Na Figura 13 pode ser observado um resultado para este processamento.

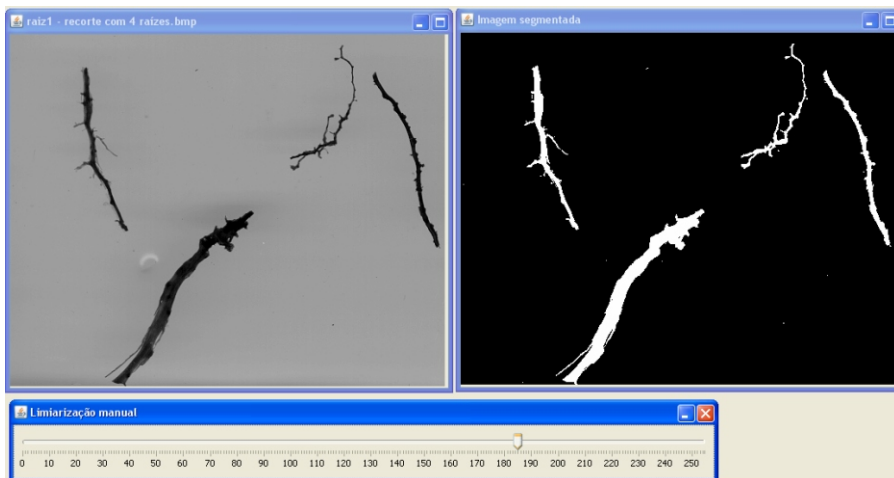
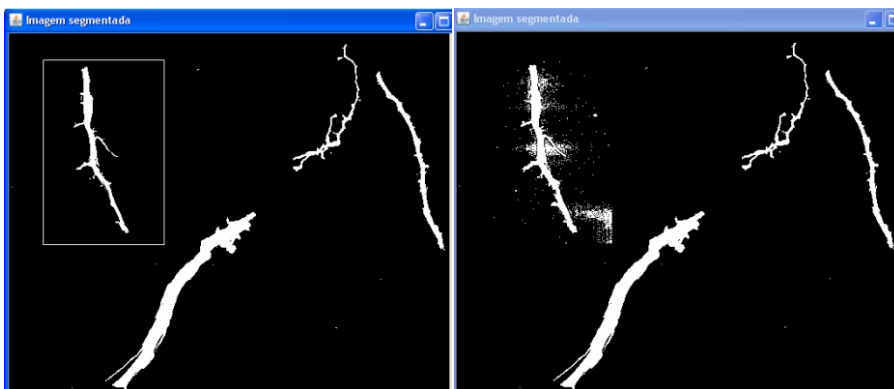


Fig. 13. Binarização global

Quando a binarização local for selecionada, deve-se escolher uma região da imagem e somente ela sofrerá alguma alteração. Para tanto deve-se selecionar uma região e aplicar o filtro. Um exemplo de seleção e o resultado pode ser visto na Figura 14. Quando o valor do limiar da binarização for alterado agora através da barra deslizante, o efeito só será aplicado à região delimitada pelo retângulo.



(a)

(b)

Fig. 14. (a) Seleção de uma parte a imagem e (b) o resultado

É importante ressaltar que após a realização de uma binarização local não se deve mais efetuar uma global, pois isso anularia o efeito da local. Ela deve ser utilizada para melhorar a qualidade de determinadas partes da imagem e pode ser aplicada em partes distintas, mas nunca deve ser feita uma binarização global logo após uma local.

O propósito da binarização é distinguir os objetos da imagem do fundo da mesma. Em geral o objeto de interesse fica preto e o fundo branco. Um bom nível de binarização é quando os objetos apresentam a forma mais parecida possível com os originais e há pouco ruído na imagem. Na Figura 15 pode ser visto o resultado da binarização indicando as raízes em preto.

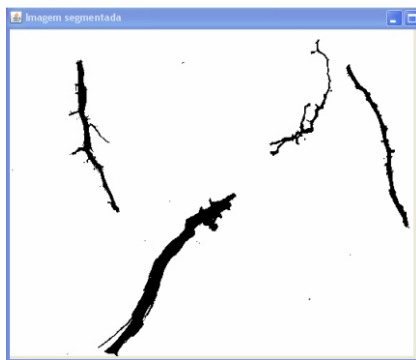


Fig. 15. Imagem binária

Uma vez binarizada a inicia-se a fase de rotulação, onde cada objeto receberá um rótulo único que os distinguirá dos demais. Após a rotulação um filtro de pequenos objetos será aplicado à imagem. Sua função é descartar qualquer objeto que possua menos pixels que uma determinada quantidade, sendo possível de ser ajustado pelo usuário. Será exibido um diálogo onde o usuário pode ajustar a quantidade mínima de pixels que cada objeto deve conter para não ser descartado.

O propósito do filtro é eliminar ruídos que não puderam ser retirados com a limiarização local e as transformações morfológicas. Dependendo do tamanho da imagem, este processo de rotulação e aplicação do filtro pode levar alguns minutos para ser realizado. Após o ajuste do filtro, deve-se avançar para iniciar a rotulação. O resultado da rotulação será mostrado ao usuário com diferentes cores, bem como o número objetos encontrados e os descartados pelo filtro, conforme Figura 16.



Fig. 16. Imagem rotulada e número de objetos encontrados na imagem

Avançando no processamento é realizada a transformada de distância sobre a imagem. A imagem resultante é dada em um degradê de cores, facilitando a identificação de áreas com diferentes diâmetros, conforme evidenciado na Figura 17.

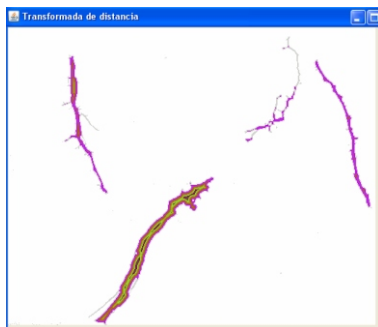


Fig. 17. Transformada de distância

Ao lado da transformada de distância são obtidos os esqueletos dos objetos através da operação de afinamento na imagem binária. O esqueleto (Fig. 18) é utilizado sobre a imagem apenas como forma ilustrativa para representar as diferentes faixas de diâmetros encontradas.

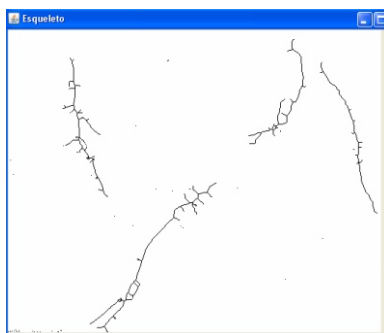


Fig. 18. Esqueleto dos objetos da imagem

Para cada diâmetro é utilizada uma cor diferente e uma mensagem indicando quantos deles foram encontrados é exibida, conforme pode ser visualizado na Figura 19.



Fig. 19. Esqueletos coloridos conforme o tamanho dos diâmetros

Na imagem da Figura 19 é possível ver qual rótulo foi atribuído a cada objeto deixando o ponteiro do mouse em cima do mesmo. Um rótulo surgirá logo abaixo dele mostrando esta informação, conforme mostrado na Figura 20.

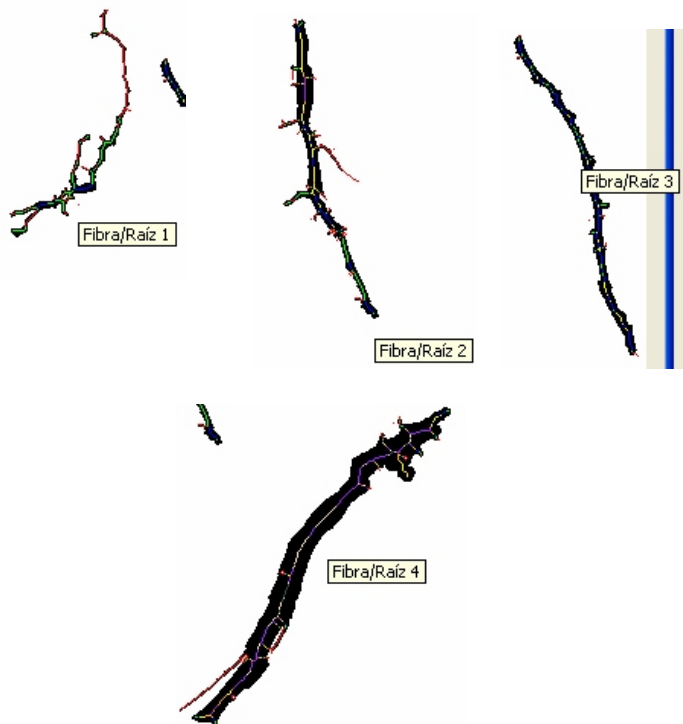


Fig. 20. Identificação das fibras ou raízes

A última etapa do processamento é a etapa onde são gerados gráficos e tabelas contendo informações sobre as fibras (Fig. 21).

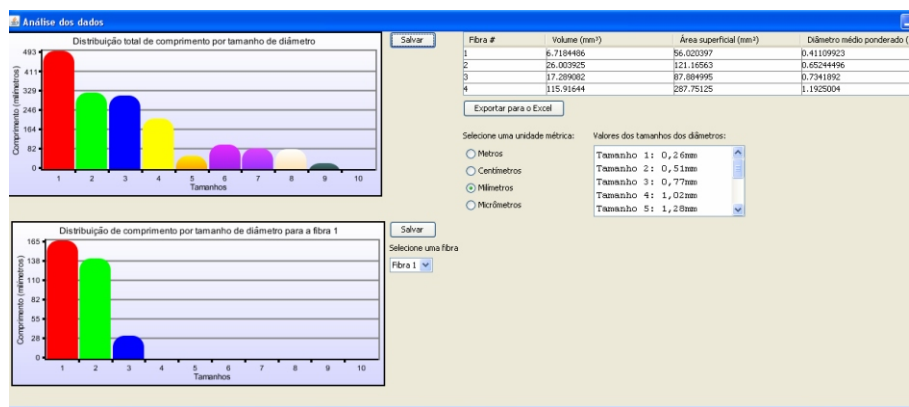


Fig. 21. Tela de resultados

Os histogramas apresentam as medidas em milímetros inicialmente. Esta escala pode ser apresentada em outras unidades, através da seleção na interface apresentada.

O histograma superior da Figura 21 mostra uma distribuição do comprimento de cada diâmetro para a figura como um todo. O de baixo mostra o histograma para cada fibra individualmente, uma vez que numa mesma fibra pode-se obter mais de uma faixa de diâmetros. Pode-se salvar os dados em forma de planilha.

Conclusão

O presente trabalho apresentou a primeira versão do software SAFIRA bem como suas funcionalidades. Pretende-se continuar desenvolvendo novas rotinas e formas de análise, como novos descritores, por exemplo, fractais e morfológicos que deverão permitir uma análise mais precisa e completa para os estudos de raízes e fibras.

O software SAFIRA deverá ser disponibilizado gratuitamente através de download na página <http://www.cnpdia.embrapa.br/labimagem>.

Referências

BARNETT, C. E.; WHITE, R. A.; PETROVIE, A. M.; GOOD, G. L. An automated apparatus for measuring root length. **Hortscience**, Alexandria, v. 22, p. 140-144, 1987.

BOHM, W. **Methods of studying root systems**. New York: Springer-Verlag, 1979.

BURKE, M. K.; LEBLANC, D. C. Rapid measurement of fine root length using photoelectronic image analysis. **Ecology**, Tempe, v. 69, p. 1286-1289, 1988.

COLLINS, R. P.; GREGORY, P. J.; ROWSE, H. R.; MORGAN, A.; LANCASHIRE, B. Improved methods of estimating root length using a photocopier, a light box and a bar code reader. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 103, p. 277-280, 1987.

COSTIGAN, P. A.; ROSE, J. A.; MCBURNEY, T. A microcomputer based method for the rapid and detailed measurement of seedling root systems. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 69, p. 305-309, 1982.

CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M. F.; JORGE, L. A. C.; RALISCH, R.; TOZZI, C. L.; TORRE-NETO, A.; VAZ, C. M. P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 3, p. 365-371, 1994.

CUNNINGHAM, M.; ADAMS, M. B.; LUXMOORE, R. J.; POST, W. M.; DEANGELES, D. L. Quick estimates of root length, using a video image analyzer. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 19, p. 335-340, 1989.

GOUBRAN, F. H.; RICHARDS, D. The estimation of root length in samples: comparison of a visual and automatic method. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 52, p. 77-83, 1979.

HARRIS, C. A.; CAMPBELL, G. S. Automated quantification of roots using a simple image analyser. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 935-938, 1989.

JAIN, A. K. **Fundamentals of digital image processing**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1989.

JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S. SIARCS 3.0: novo aplicativo para análise de imagens digitais aplicado a ciência do solo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia-SP. **Solo suelo 96**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 5 p. 1 CD-ROM.

JORGE, L. A. C.; MARIA, I. C. de; LOMBARDI NETTO, F.; CRESTANA, S. Avaliação da cobertura do solo por culturas através de processamento de imagens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO - CERRADOS: FRONTEIRA AGRÍCOLA NO SÉCULO XXI, 24, 1993, Goiânia-GO. **Resumo...** Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. v. 3. p. 139-140.

JORGE, L. A. C.; MEDINA, C. C.; RALISCH, R.; BRINHOLI, O.; SAAB, O. A.; CRESTANA, S. Estudo do perfil de enraizamento de uma cultura de cana-de-açúcar através do "SIARCS", com filmagens a diferentes distâncias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO: O SOLO NOS GRANDES DOMÍNIOS MORFOCLIMÁTICOS DO BRASIL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO, 25, 1995, Viçosa-MG. **Resumos expandidos...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. v. 4. p. 2084-2086. ref.VI.129.

KRSTANSKY, J. J.; HENDERSON, G. S. Computerized measurement of fine root length using a desktop image scanner. **Agronomy Abstracts**, Madison, p. 307, 1989.

LEBOWITZ, R. J. Digital analysis measurement of root length and diameter. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 28, n. 3, p. 267-273, 1988.

MARSH, B. Measurement of length in random arrangements of lines. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 8, p. 265-267, 1971.

NEWMAN, E. I. A method of estimating the total length of root in a sample. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 3, p. 139-145, 1966.

OTTMAN, M. J.; TIMM, H. Measurement of viable plant roots with the image analyzing computer. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 1018-1020, 1984.

PAN, W. L.; BOLTON, R. P. Root quantification by edge discrimination using a desktop scanner. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, n. 6, p. 1047-1052, 1991.

RICHARDS, D.; GOURBRAN, F. H.; GARWOLI, W. N.; DALY, M. W. A machine for determining root length. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 52, p. 69-76, 1979.

ROWSE, H. R.; PHILLIPS, D. A. An instrument for estimating the total length of root in a sample. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 11, p. 309-314, 1974.

TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 63, p. 995-1001, 1975.

VOORHEES, W. B.; CARLSON, V. A.; HALLAUER, E. A. Root length measurement with a computer-controlled digital scanning micro-densitometer. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 347-351, 1980.

WILHELM, W. W.; NORMAN, J. M.; NEWELL, R. L. Semiautomated X-Y ploter based method for measuring root lengths. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 149-152, 1983.

ZOON, F. C.; VAN TIENDEREN, P. H. A rapid quantitative measurement of root length and root branching by microcomputer image analysis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 126, p. 301-308, 1990.



Embrapa Instrumentação Agropecuária

**Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

